

配管および塔槽類における CFD 解析

CFD Analysis for Piping, Drums and Vessels

平田隆*1

Takashi Hirata*1

*1 エンジニアリング本部 EN テクノロジーセンター

*1 EN Technology Center, Engineering Division

要旨

当社ではプラントを構成する配管・塔槽類、回転機器や燃焼機器などに関する CFD (Computational Fluid Dynamics) を使った性能評価や流れの可視化を設計段階から実施し、性能が優れ、運転性や安全性が高いプラントを建設するうえで成果を上げている。本稿では配管や塔槽類に関する最近の検討事例について紹介する。

Abstract:

At JGC, CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis is utilized in plant design for evaluating equipment and analyzing fluid flow in order to design a plant that is superior in performance, operability and safety. In this article, the latest examples of CFD analysis regarding piping, drums and vessels carried out at JGC are introduced.

1. はじめに

従来、CFD (Computational Fluid Dynamics) は流れ、熱移動や反応など比較的簡単な問題に使われてきたが、最近では気液界面の変動を伴う気液 2 相流の流動現象、蒸発・沸騰やキャビテーションなど相変化を含む複雑な流れの解析にも使用され、適用分野が拡大している^{1),2),3)}。また、コンピューターや並列計算技術の発達により、機器の構造を正確に再現した幾何学モデルを使用し、高度な乱流モデルを使用した精度の高い解析が可能となっている。当社ではプラントを構成する配管・塔槽類、回転機器や燃焼機器などに関する CFD を使った性能評価や流れの可視化を設計段階から実施し、性能が優れ、運転性や安全性が高いプラントを建設するうえで成果を上げている。本稿では配管や蒸留塔・ドラムなどの塔槽類に関する最近の検討事例について単相流と多相流に分けて紹介する。

2. 配管や塔槽内の解析事例

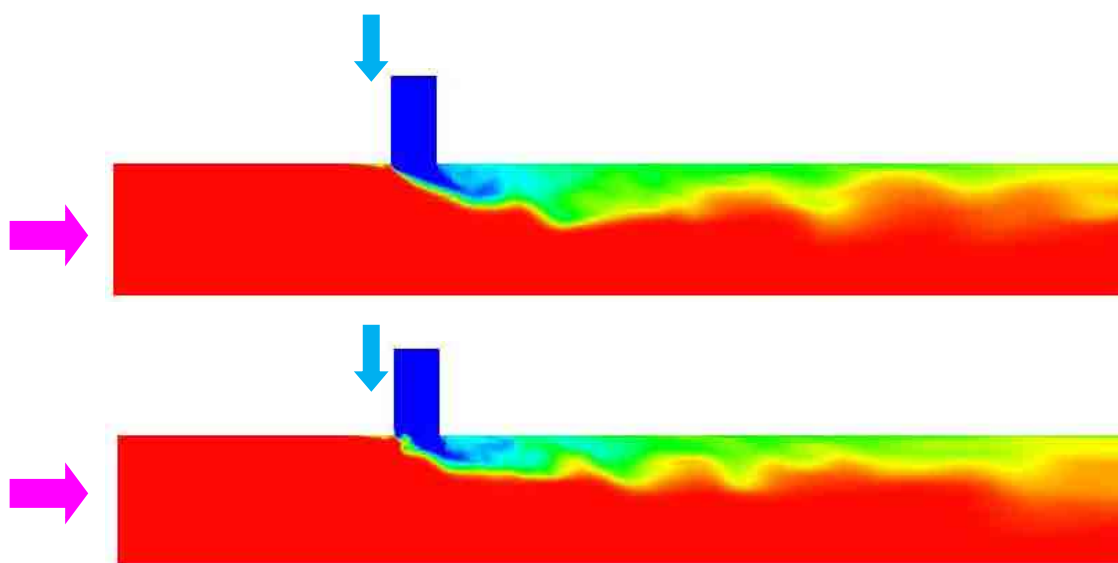
2. 1 単相流の流れ

CFD による配管内や塔槽内の単相流の解析は以前から行われており、特に目新しいものではない。最近では並列計算機を使った大規模計算が一般に行われ、配管構造や塔槽内インターナルなど現実に近い構造を使った高精度な解析が可能となっている。構造の正確さのみならず、壁面の近傍や遠方など流れの状況に合わせたハイブリッド型乱流モデルや微細な乱流渦まで解くことができる LES (Large Eddy Simulation) も容易に使用でき^{4),5),6)}、現実に近い結果が

得られるようになっている。また、解析領域内の流れの変化が大きく、詳細な流れの解析が必要な場所を CFD プログラムで自動判別し、メッシュを再分割する解析手法⁷⁾により、時間短縮と精度向上を両立した解析も可能である。

① 流体合流部のサーマルストライピング

温度が大きく異なる混合ラインのサーマルストライピングに関する検討事例を図 1 に示した。サーマルストライピングとは、高温流体と低温流体間の温度差が大きな配管合流部において、流れの揺らぎ現象により温度が時間的、空間的に大きく変動し、温度変動による熱応力を長期間にわたって受ける現象である。配管合流部の材料は、最悪の場合、熱疲労により損傷する。熱疲労による配管材料損傷の恐れがある場合、合流部内面に保護具であるスリーブを設置する必要がある。サーマルストライピングに関しては原子力分野で精力的に研究が行われているが⁸⁾、スリーブ設置に関する明確な判定基準がない。当社では、流れの揺らぎ現象の解析が可能な LES 乱流モデルを用いて、合流する流体の温度差や流速比の違いによるサーマルストライピングの解析を実施した。CFD の解析結果に基づき合流部配管材料への影響を構造解析により評価し、スリーブの有無およびスリーブの仕様を決定できる。



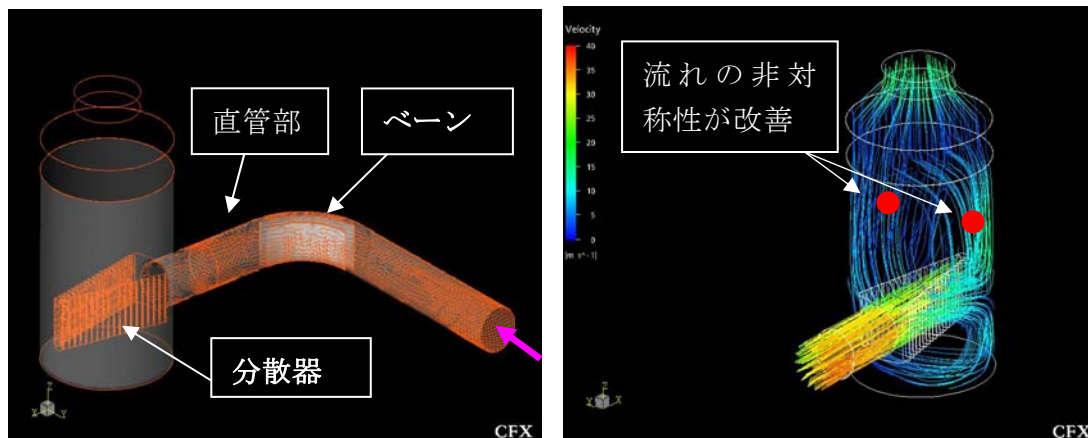
(上：ある時間での温度分布、 下：4 秒経過後の温度分布)

図 1 流体合流部断面における温度分布

② 塔内分散器の性能評価

塔内分散器や入口部配管構造の違いによるガス分散性能評価を目的とした検討事例を図 2 に示した。最近のプラントは大型化が進み、直径が 1～2 m の配管もまれではない。分散器入口部の直管長さは配管径の 5～10 倍 (L/D 比) 程度が望ましいが、プラント内のレイアウトの制限からこのような直管長さを確保することが難しい場合が多い。この事例では L/D 比が 2 程度と短く、上流側配管曲がり (エルボ) による流れの偏りが塔内に設置された分散器内まで持ち込まれ、分散器の性能に影響を与える恐れがあった。本検討では分散器の詳細な構造を再現した幾何学モデルを使用して CFD 解析を実施した。その結果、直管部の L/D 比が 2 程度と短

い場合でもエルボ内部に数枚の板状整流板（ベーン）を挿入することにより、分散器における流れの非対称性は残るものの、分散器性能への悪影響を大幅に低減できることが分かり、分散器の性能確保に役立てることができた。

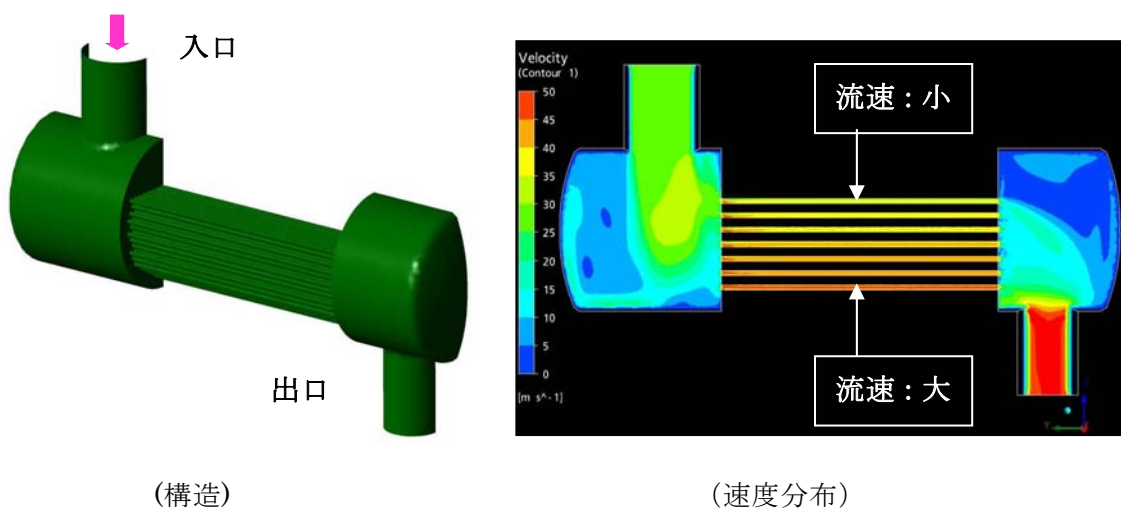


(内部構造：一部非表示) (流線分布：表示色は流線上での速度を示す)

図2 ディストリビュータの構造および流線分布

③ 熱交換器におけるチューブ内流れの偏流

熱交換器、チューブ側流れの分布に関する検討事例を図3に示した。熱交換器設計においてはチューブ毎の流速が均等に流れるとの前提でチューブの伝熱面積を決定する。しかしながら、チューブ側の圧力損失が極端に小さい場合など、チューブ毎の流速に偏りが生じると、伝熱性能が低下する。本検討事例ではチューブ毎の流速に±20%程度の分布があり、伝熱性能への悪影響があることがCFD解析により判明したため、チューブ入口側に偏流防止対策を行うことにした。このように機器の運転条件が従来の設計条件と極端に異なる場合にもCFDによる事前評価を行い、プラントの信頼性向上に効果を上げている。



(構造)

(速度分布)

図3 熱交換器構造およびチューブ側の流速分布

④ 本管に接続されたノズルの伝熱解析

異材溶接部を含む計測用ノズル配管材料の供用可否判定を目的とした伝熱解析事例を図4に示した。流体温度が高い場合、本管には温度特性に優れた高級材料を使用するが、様々な要件から本管に付属するノズルには温度特性がやや劣る一般材料を使用する場合がある。本検討では接合部構造および材料の種類を変え、本管とノズル間の温度を確認し、接合部やノズルの温度が使用限界温度以下であることを確認することにより、適切な接合部構造および材料を選定した。

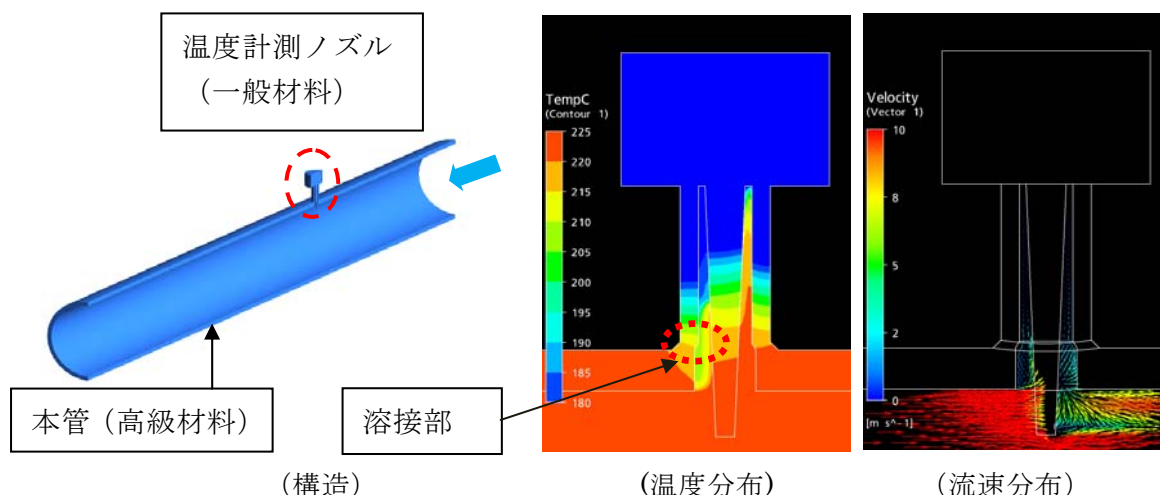


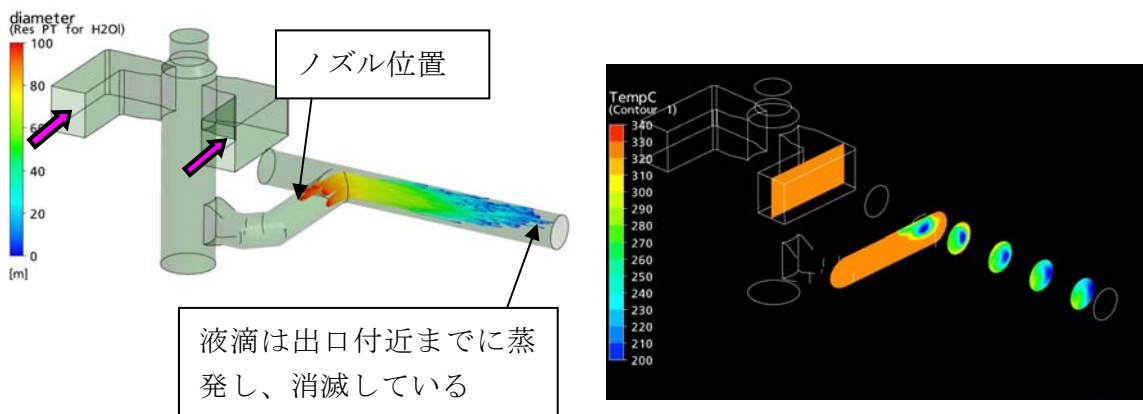
図4 計測用ノズル付近の温度分布および速度分布

2. 2 2相流に関する解析

最近気泡塔など気液2相の流れ、サイクロンなど気固2相の流れ、および水・オイル・ガスの液・液・ガスの3つの相からなる気液2相の流れなどの多相流解析が可能である。また、液滴のガス中での蒸発など相変化を伴う解析が可能になり、プラントを構成する機器内で実際に起きている現象を再現することができるようになってきた。ここでは2相流および相変化を伴う流れに関する解析事例について紹介する。

① ガス冷却のためのスプレー水噴霧

非常時のガス冷却に使用するスプレー水の検討事例を図5に示した。廃熱回収装置が異常停止した場合、高温の排ガスは、廃熱回収装置をバイパスし、直接フレア側に排出される場合がある。この際、高温排ガスから下流の配管材料を保護するため、排ガス中にスプレー水を噴霧し強制冷却する。本検討ではスプレーノズルが下流にある Tee 部の直近に設置され、出口までの距離も短いため、配管壁面への液滴の衝突や出口付近での残留液滴による配管底部の液濡れの心配があった。本検討では粒径分布を持つ水滴をノズルから噴霧し、ラグランジュ法、すなわち、流体の動きに付随する動座標を用い、噴霧した個々の水滴の軌跡を求め、水滴の蒸発による排ガス温度の冷却を考慮した。検討の結果、噴霧された液滴は管壁に衝突することなく、出口に到達する間に完全に蒸発し、液濡れによる腐食の心配がないことが分かった。この事例のように、最近より安全なプラントを建設するためのCFD利用が増加する傾向にある。



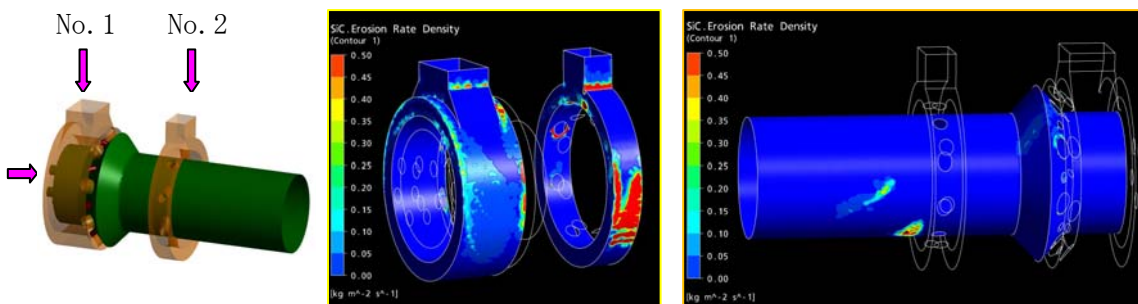
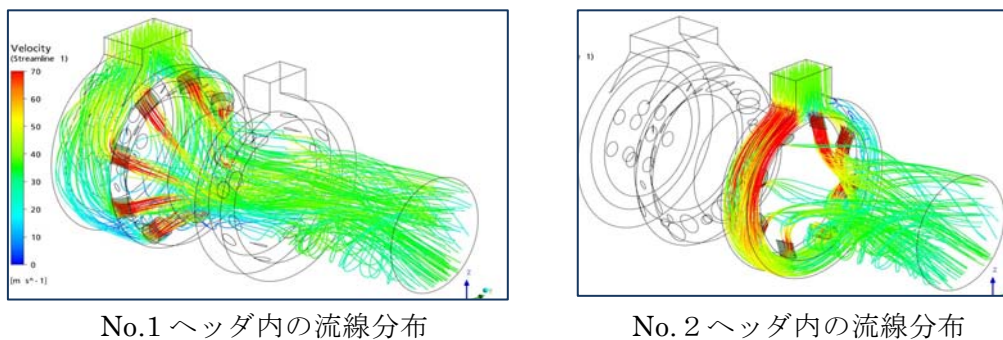
水滴の軌跡 (表示色は液滴径を示す)

ガス温度分布

図5 配管内における水滴の軌跡と排ガス温度

② 同伴粒子による燃焼炉内面のエロージョン

粒子を含む排ガスによる燃焼炉内面のエロージョン (侵食・摩耗) に関する検討事例を図6に示した。本検討でも固体粒子に関するラグランジュ法を使用し、排ガスに同伴された個々の固体粒子の軌跡を追跡し、壁面への衝突までを解析した。エロージョンによる減肉量は衝突時の粒子速度から求める経験式が知られており⁹⁾、燃焼炉内面に貼られた耐火材の局所的な減肉量を推定可能である。検討の結果、排ガス供給のための2つのリング状ヘッドと燃焼室内面においてエロージョンが発生する可能性があることが分かった。これらの検討結果を基にヘッドおよび燃焼室内面の耐火材を補強することで長期にわたる安定な運転を行うことが可能であることを明らかにした。



燃焼炉の構造

ヘッドのエロージョン

燃焼室のエロージョン

図6 燃焼炉における流線分布とエロージョン発生量

③ 気液2相流の流れ

ガス・オイル・水からなる気液2相流の減圧用バルブにおける検討事例を図7および図8に示した。配管系に高低差や液だまりがあり、スラグ流などの流動パターンを示す場合、脈流により圧力の大きな変動が起こり、配管系の振動を引き起こす場合がある。本検討では気液2相流の流れの状況や圧力変動を把握するため、ガス・オイルの気液界面およびオイル・水の液液界面を考慮した非定常解析を実施した。検討の結果、オイル・水ともバルブ出口の水平配管部に一定量が溜まった後、一気に垂直部を吹き上げる現象を繰り返す、すなわち脈流を生じるが、圧力変動は許容範囲内にあり、振動など運転上の問題がないことが分かった。

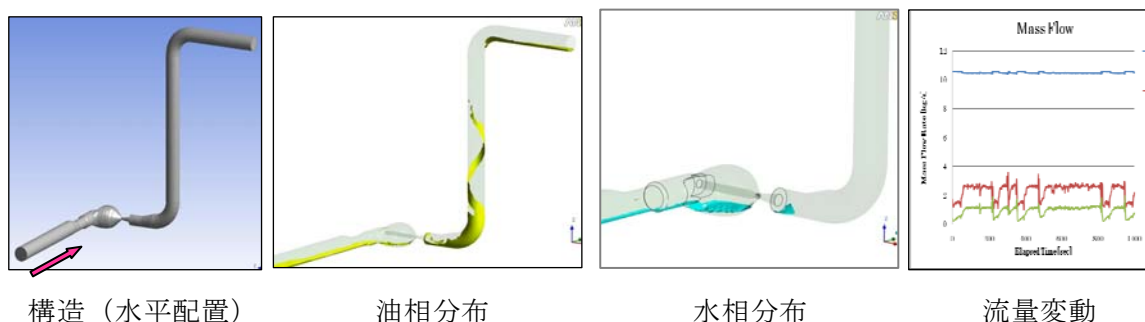


図7 配管内における気液2相流の流れ

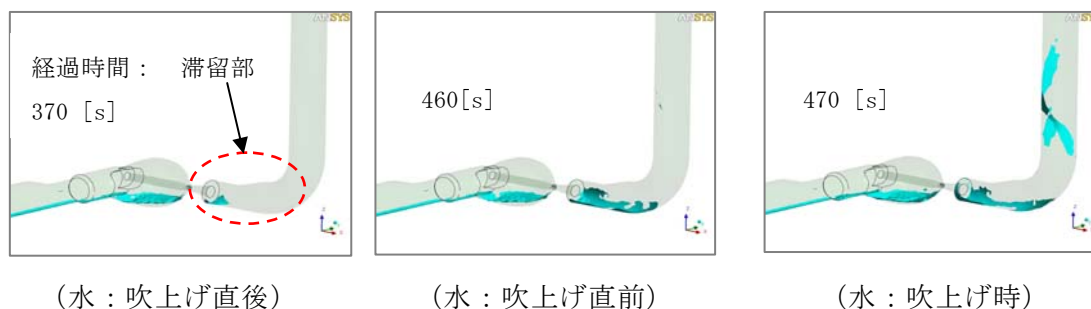


図8 配管内における水相の流れの時間的変化

3. おわりに

配管や塔槽における解析事例の一例を紹介した。CFD は検討できる事象にはまだまだ制限はあるものの、プラントを構成する多くの装置で発生する現象を再現することができるようになってきている。解析精度も向上し、定量的な評価が可能である。当社においては設計段階での機器性能、運転性や安全性評価への CFD 利用が増加する傾向にある。今後とも、信頼性が高いプラント設計を行うため CFD を多いに活用していく予定である。

参考文献

- 1) 山下, 近藤; 液面揺動問題についての数値シミュレーション, 第17回数値流体力学シンポジウム D4-2 (2002)
- 2) He, Y., et al; *International J. of Heat and Mass Transfer*, **44**, 2357-2373-30 (2001)
- 3) Saito, Y., et al.; 5th International symposium on cavitation, Osaka, Japan, Cav03-OS-1-006 (2003)

- 4) Eisfeld, B.; Computation of complex compressible aerodynamics flows with a Reynolds Stress Turbulence model, Int. Conference on Boundary and Interior Layers, BAIL (2006)
- 5) Tucker, P. G.; *J. of computational physics*, **190**, 229-248 (2003)
- 6) 鬼頭ら ; 生産研究、**59**、Vol.1, 27 (2007)
- 7) 数値流体力学編集委員会編 ; 数値流体力学シリーズ 6、格子形成法とコンピュータグラフィックス、東京大学出版会 (1995)
- 8) 日本機械学会編 ; 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針 (JSME S017-2003)
- 9) Sato, S., et al.; Numerical prediction of erosion for suspension flow duct *Wear*, 186-187 203-209 (1995)